

NIEUWE HARDWARE: VAN SDR NAAR SDR-SERVER

In deel 1 werd vastgesteld dat SDR's met de architectuur van de eerste generatie haar grenzen bereikt heeft door het knelpunt dat ontstaat in de dataoverdracht tussen SDR en PC. Door de architectuur van de 3^e en 4^e generatie dat de SDR server scheidt van de PC wordt deze bottleneck overwonnen.

In het vorige deel hebben we vastgesteld dat voortgaan met het concept van een SDR radio dat werd bestuurd met een interne of externe PC een heilloze weg was.

De noodzaak om de architectuur van de 1^e generatie te verlaten bracht de ontwikkelaars van SDR-concepten tot verschillende oplossingen (afb. 3 in deel 1).

FlexRadio Systems heeft gekozen voor de inzet van speciale, daarvoor ontwikkelde, processoren in de SDR hardware (figuur 3b van deel 1) en beschikt daardoor over een SDR die ook inzetbaar is voor toekomstige ontwikkelingen. Een bijkomend voordeel is dat de SDR-hardware nu onafhankelijk is geworden van het type externe PC en/of het operating-system. Bediening met Window PC's, alle soorten tablets, besturingssystemen zoals Windows, Linux, Android of iOS (ook op iPad) behoort nu tot de mogelijkheden. Ook speciaal hiervoor ontwikkelde hardware (de "Maestro") is beschikbaar.

Daarentegen zal de HPSDR groep voor experimenteel geïnteresseerde radioamateurs wellicht een andere weg inslaan (zie fig. 3b en 3c van deel 1). De SDR-hardware wordt gereduceerd tot een ADC en een FPGA¹, terwijl de ruwe data van de ADC breedbandig aan een SBC² wordt

aangeboden[11]. Deze goedkope SBC's maken gebruik van het Operating System Linux. SBC's bieden van jaar tot jaar meer rekenkracht terwijl de prijs niet hoger wordt.

In financieel opzicht lijkt deze oplossing bestaansrecht te hebben.

De SBC van NVIDIA, Jetson TK1, is een uitstekende kandidaat, het board beschikt over een Ethernet interface van 1 Gbps. Deze data snelheid komt overeen met dat van de uitgang van een ADC, die met 64,144 Msp³ en een 16 bit databreedte het spectrum scant. Aldus is een spectrum van 30 MHz af te dekken.

Voor de SBC komt het er op aan dat het de data niet via een rietje ontvangt maar door een brandweerslang. De eerste testen met dit systeem lijken veelbelovend.

Alle taken van de digitale signaalverwerking zoals de reducering van de datastroom (in het Engels "decimation" genoemd), het vastleggen van de bandpartitie ("slice") binnen het 30 MHz spectrum – DDC⁴ en synthetiseren van het zendsignaal – DUC⁵, wordt door de SBC verzorgd.

Een andere manier beschrijft ELAD met de FM-DUO die gedeelten van de digitale signalen in de SDR laat

verzorgen (FPGA) en daardoor de radio zowel geschikt doet zijn voor stand-alone gebruik als in verbinding met een PC.

HOGE TRANSFERRATES BINNEN DE SDR-SERVER

In het concept van Flex-Radio System wordt slechts een geringe hoeveelheid data door de SDR-server aan de client aangeboden. Maar binnen de SDR moeten er enorme datahoeveelheden worden verwerkt. Bij de FLEX-6700, met twee onafhankelijke ingangsdelen (Afb. 7), wordt door de gelijktijdige dataoverdracht van beide HF/VHF spectra en het gedigitaliseerde zendsignaal plus de bedieningscommando's maar liefst een datastroom met een snelheid van ca. 9 Gbps (Gigabit per seconde!) verwerkt.

Alleen al door de beide ADC's met een sampling rate van 245,76 Msp bij een databreedte van 16 bits, schuift er 7,864 Gbps naar de processor in de SDR server.

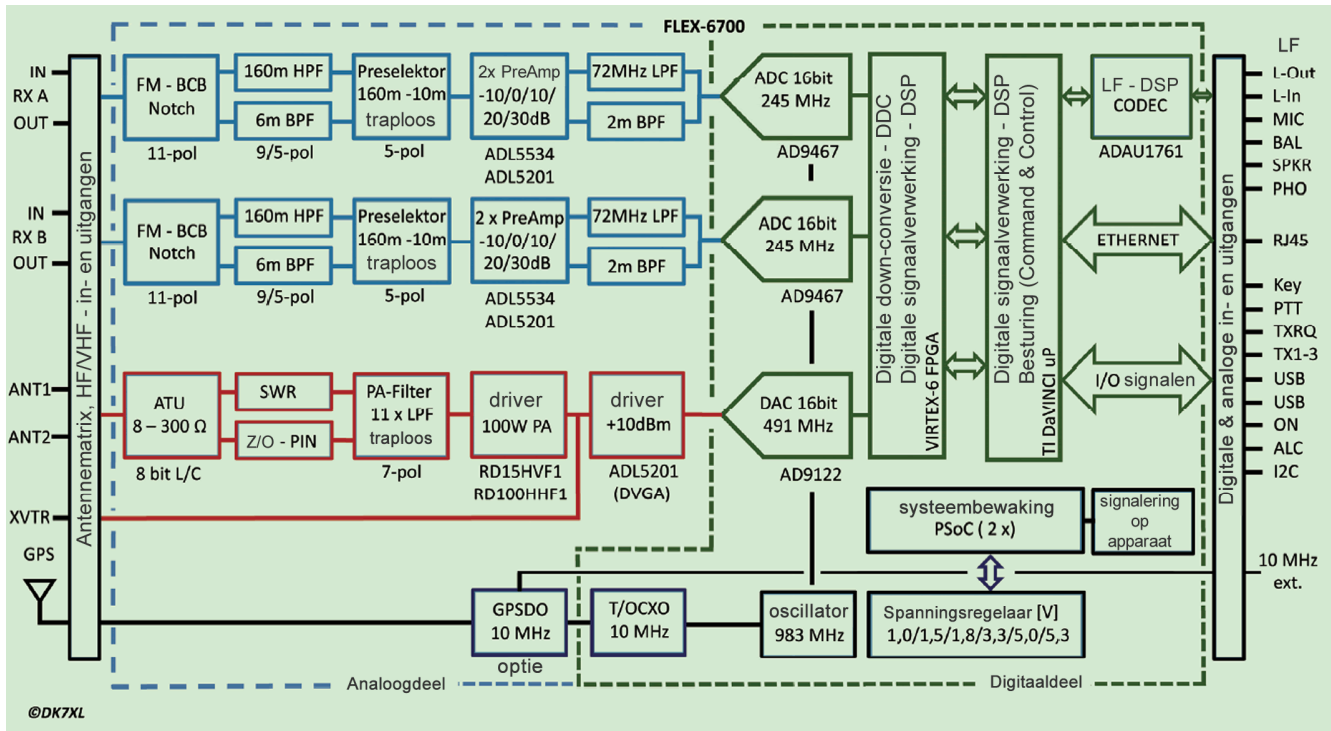
¹ Field Programmable Gate Array

² Single Board Computer

³ Mega samples per seconde

⁴ Digital Down Conversion

⁵ Digital Up Conversion



Afbeelding 7a: De basisopbouw van de FLEX-6000 serie wordt hier vereenvoudigd weergegeven.
Hier het blokschema van de FLEX-6700 met twee onafhankelijke ingangsdelen (Spectrum Capture Units – SCU)

Om een FLEX-6700 met alle acht ontvangers plus de bijbehorende panorama adapters en watervallen te gebruiken stroomt er slechts maximaal 500 kbps aan dataverkeer naar de client, dus de PC of ander bedieningsapparaat

Bij een FLEX-6500 is het aantal ontvangers vanwege de inzet van een minder krachtige FGPA tot 4 begrensd, bij de FLEX-6300 tot 2.

Het aantal signalen dat zichtbaar wordt gemaakt in de panorama-adapter heeft geen invloed op de overgedragen datahoeveelheid. De grootte van de weergave daarentegen wel. Dit maakt duidelijk dat er geen ruwe I/Q data wordt overgedragen, maar alleen data ten behoeve van de beeldopbouw, dat bij weergave op een groter scherm gedetailleerder wordt (!). Dit is gedaan in de wetenschap dat monitoren met een zeer hoge resolutie (4k - 3840 x

2160 pixels) steeds goedkoper worden en dus aantrekkelijk zijn om voor dit soort toepassingen te gaan gebruiken.

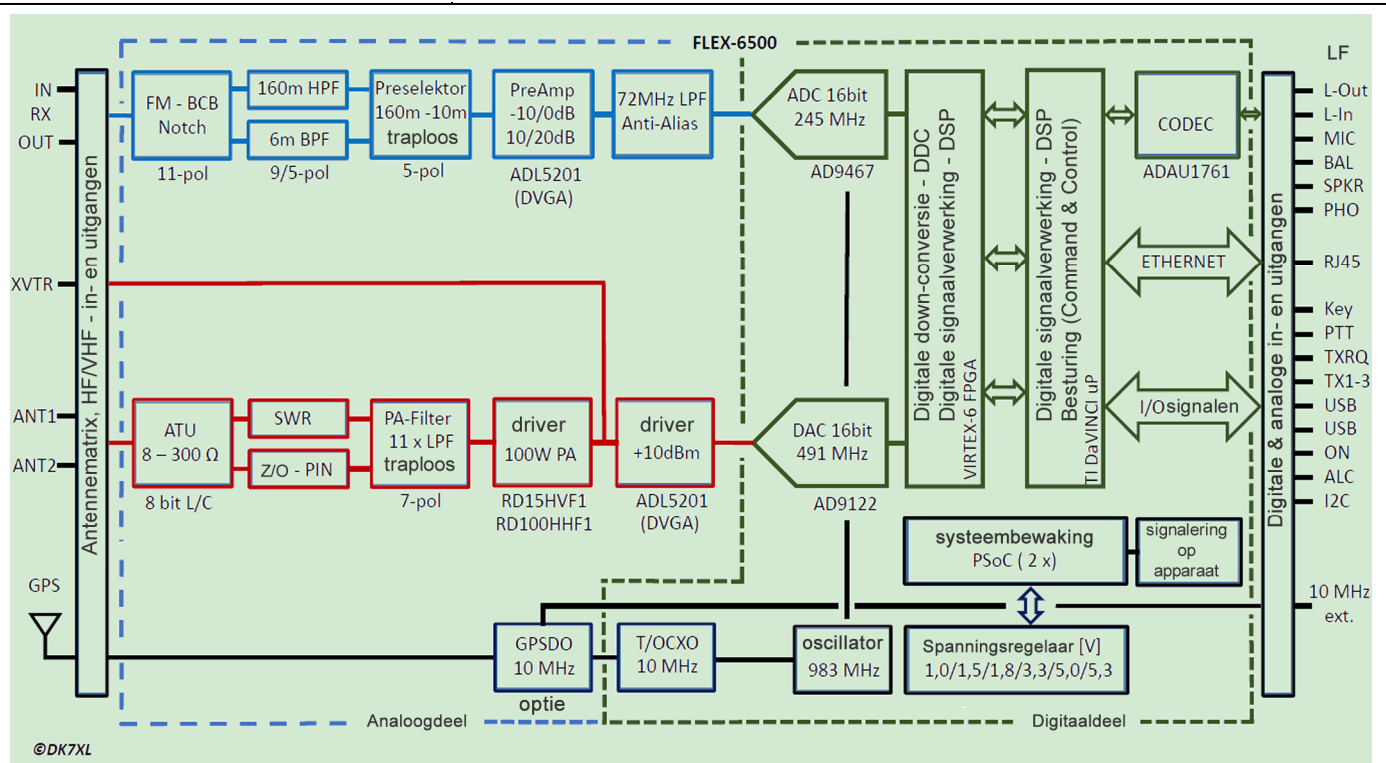
Hoe groot de data-overdracht is gedaan maakt de volgende vergelijking duidelijk: Met de client-server architectuur is, onafhankelijk van de bandbreedte instelling 1 MHz of 10 MHz, altijd minder dan 0,5 Mbps nodig. Als bij andere systemen met 10 MHz bandbreedte de I/Q data wordt overgebracht zal daarvoor een dataoverdracht van 770 Mbps het gevolg zijn.

Toch is de flex-6000 serie voorzien van een 1 Gbps Ethernetpoort. Hierdoor kan ruwe data zoals I/Q en audio paren van de verschillende ontvangers naar een PC worden gestuurd om daar verder verwerkt te worden.

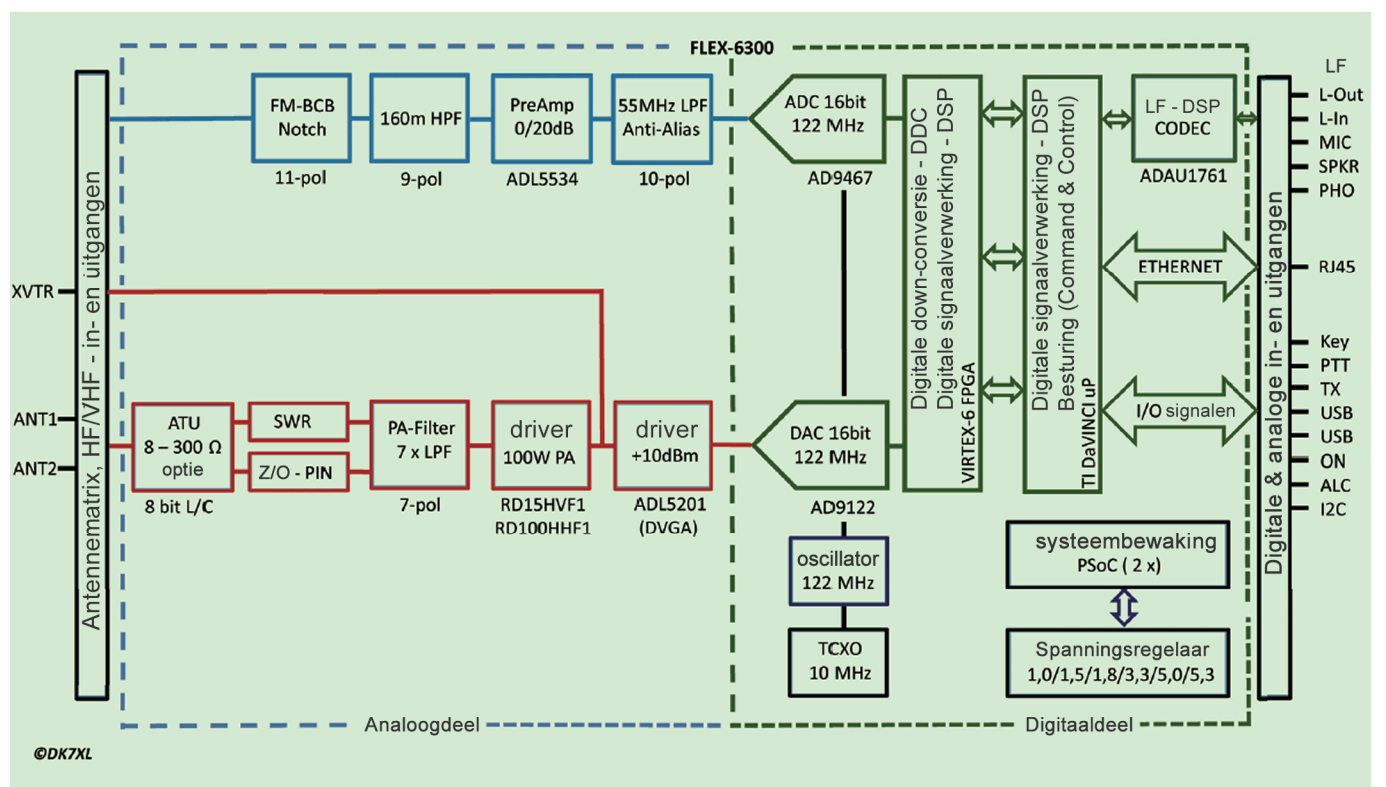
BLOKSCHEMA'S VAN DE FLEX-6000 SERIE.

Niet alleen de hardware van de FLEX-6000 serie is van de grond af aan opnieuw opgebouwd, hetzelfde geldt voor de software. Meer daarover in deel 3 en 4 van deze serie. De opbouw van alle 3 apparaten uit de FLEX-6000 serie is identiek. Zie de blokschema's 7 a, b en c. Afwijkend is het aantal ontvangers (6700 twee, de beide andere één), de voorversterkertrein, de preselektors voor 1,8 ... 30 MHz, de ATU en de GPSDO.

Ook is er verschil in de gebruikte componenten, de 6700 heeft nu eenmaal meer rekenkracht nodig dan zijn beide broertjes. De opbouw van het digitale gedeelte is bij de drie apparaten nagenoeg gelijk. Om stoorsignalen vanuit het digitale gedeelte te voorkomen is het ondergebracht in een hermetisch afgeschermd box.



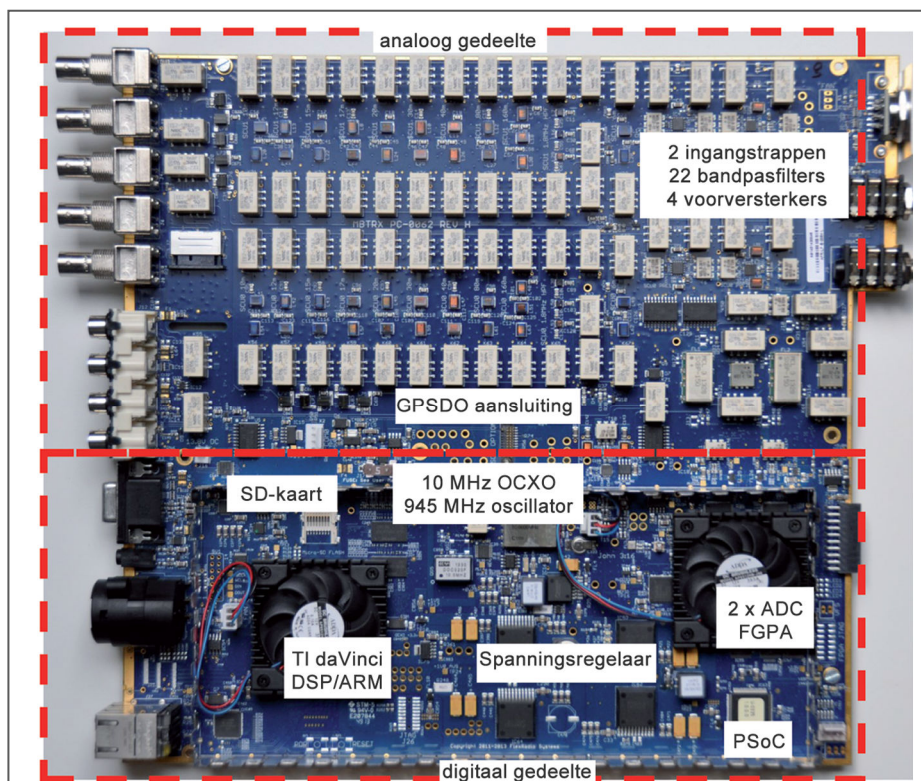
Afb. 7b. De FLEX-6500 beschikt slechts over één SCU maar is qua opbouw grotendeels gelijk aan de FLEX-6700.



Afb. 7c. De FLEX-6300 heeft een breedbandige ingang.

Het HF signaalspectrum uit het ingangscircuit wordt aangeboden aan het digitale gedeelte en wordt met een AD-9467 gedigitaliseerd. Deze ADC is voorzien van een interne buffer, die daadwerkelijk direct met de antenne kan worden verbonden. De

vaak gebruikte LTC2208 heeft daarentegen, om een juiste impedantie te verkrijgen, een externe buffer nodig.



Afb. 8 Het moederbord met het digitale gedeelte en de ingangstrappen van de FLEX-6700. De print is door middel van een flexibele foliekabel met de eindtrap verbonden. De printplaat met 8 lagen maakt het mogelijk de signalen van en naar de FPGA en de daVinci DSP-processor met hun 240 respectievelijk 1031 (!) aansluitingen (zgn. "Ball Grid Array" - BGA) te verbinden.

DIGITAAL DEEL MET KWALITATIEF HOOGWAARDIGE COMPONENTEN.

Beide ADC's zijn vanwege de kortst mogelijke weg die maar liefst 192.000 logische blokken omvat, direct voor de FPGA geplaatst. De voedingsspanning is slechts 1 Volt, deze lage spanning is gekozen omdat alleen bij lage spanningen de omvormingstijden van de capaciteiten dusdanig snel zijn dat alleen dan de hoge verwerkingssnelheden van 1200 MHz haalbaar zijn.

In de FPGA worden de mathematische algoritmen, die de oscillatoren en mixers vertolken, met logische blokken gerealiseerd.

Het proces van het naar beneden delen (DDC) van de datastroom, maar ook het extrapoleren van zenddata naar hogere frequenties zoals de bemonsteringsfrequentie (DUC) en de keuze van een bandgedeelte vindt in de FPGA plaats. Het

voert te ver om alle functies die binnen de FPGA worden uitgevoerd in deze artikelenreeks te beschrijven.

De DAC met een klokfrequentie van 491,52 MHz is rechtstreeks verbonden met de FPGA.

Een ander belangrijk deel van de digitale eenheid is de Texas Instruments (TI) daVinci DSP-processor met geïntegreerde ARM microprocessor. De daVinci heeft een extern DDR3 geheugen van 512 Mb. Op een van buiten niet toegankelijke SD-geheugenkaart wordt de firmware en de individuele configuratie op een zeer betrouwbare manier opgeslagen.

De SD kaart (een zgn. SLC based eMMC kaart) heeft niets gemeen met de in de handel verkrijgbare SD kaarten. De kaarten hebben een significant hogere lees/schrijf cyclus, helaas is de prijs ook tienmaal zo hoog.

De TI daVinci processor verzorgt ook alle interfaces binnen de SDR server, zoals SPI, I2C, Ethernet, RS-232. Daarnaast nog de externe interfaces: 1 Gbps Ethernet en 2 x USB. De digitale unit herbergt diverse spanningsregelaars, de 983,04 MHz referentie-oscillator en de 10 MHz OCO⁶.

De FPGA en de TI daVinci processor zijn hoogwaardige componenten die voorzien zijn van diverse beveiligingen.

De processoren bewaken zelf hun temperatuur. Ze worden door ventilatoren gekoeld waarvan het toeren-tal wordt geregeld door een processor, de PSoC⁷. Deze processor draagt de verantwoording voor de totale besturing op het moederbord [12].

HET ANALOGE GEDEELTE VAN DE FLEX-6700

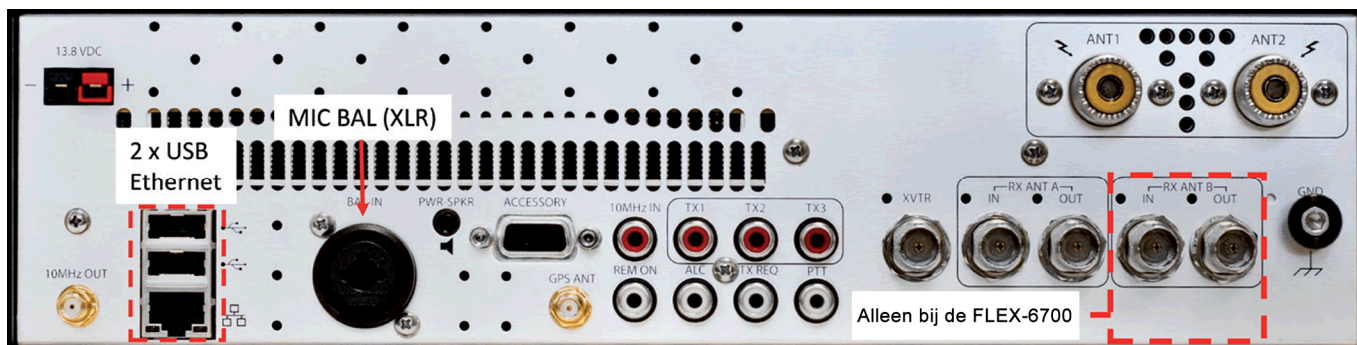
De ADC is de scheiding tussen het analoge en digitale deel.

Er kunnen 2 antennes aan twee van elkaar onafhankelijke ingangstrappen geschakeld worden. Via een 3 dB splitter kan er eventueel één antenne gedeeld worden. Alle HF en VHF in- en uitgangen kunnen via de matrix worden gerangeerd.

Om optionele apparaten en/of filters toe te voegen (afb. 9) kunnen de ingangssignalen van de ontvanger worden onderbroken en naar buiten uitgevoerd (RX A/B in/out). De signalen passeren eerst een FM-omroepband notch-filter (FM-BCB), gevolgd door een 1,8 MHz hoogdoorlaatfilter en een 54 MHz banddoorlaatfilter. Daarop volgt de HF-preselector die met negen bandpasfilters traploos het gebied van 1,8 – 30 MHz bestrijkt.

⁶ Oven-Controlled Crystal Oscillator

⁷ PSoC – Programmable System on Chip.



Afb. 9: Achteraanzicht van de FLEX-6700.

Dan volgen de voorversterkers (ADL5534 met 20 dB gain en een ADL5201⁸) die het dynamisch bereik van de ontvanger binnen ruime grenzen waarborgen.

Het doel is immers onder alle omstandigheden geen dynamisch bereik prijs te geven. Elke dB aan dynamisch bereik onder het basisniveau (en dat is helaas slechts voor het kleinste

ten die zouden kunnen ontstaan uit de 2^e Nyquistzone [12-15]

TRANSVERTER, MEETZENDER FUNCTIE EN NIEUWE BANDEN.

De FLEX-6000 serie is voorzien van een XVTR uitgang die het totale frequentiegebied van de transceiver omvat. Hierdoor kan de transceiver ook gebruikt worden op nieuwe

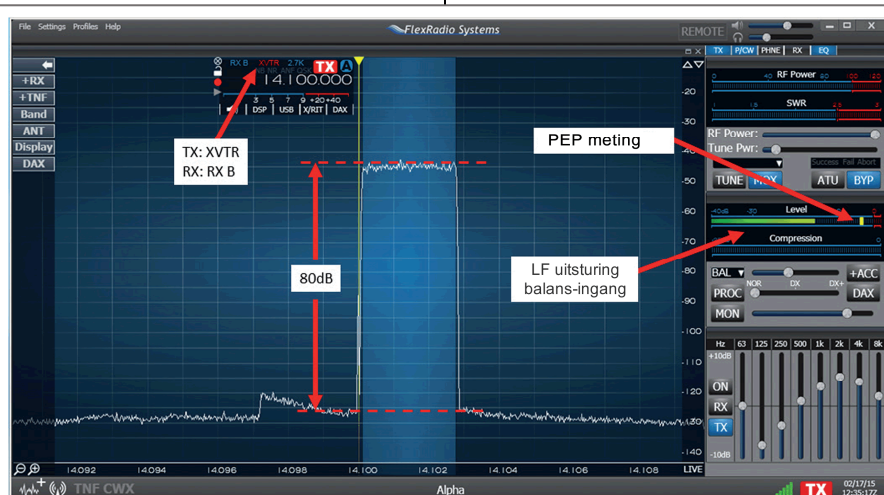
de PA uitgeschakeld en is de zender doorlopend af te stemmen. De zend-amateur beschikt daardoor niet alleen over de mogelijkheid om nieuwe banden te gebruiken maar ook over een meetzender in alle modes.

De spectrale reinheid van een zend-sigitaal dat door een DAC in de SDR techniek wordt gegenereerd is met analoge technieken slechts met grote moeite en hoge kosten te bereiken.

Zo ook bij de FLEX-6000: De zijbandonderdrukking tijdens modulatie met ruis is ca. 80 dB (afb. 10) terwijl de draaggolfonderdrukking beter is dan -70 dBc en ook IMA3⁹ bij + 6 dBm beter is dan -70 dBc.

2 METER BAND MET DE FLEX-6700

Digitalisering van het HF-spectrum maakt het mogelijk om ook 2^e. Nyquistzone, zogenaamde "oversampling" te benutten. De FLEX-6700 beschikt voor dit doel over een tweede voorversterker met een ADL5534 en een 2-meter bandpasfilter. De DAC wordt geklokt met 491,52 MHz en daardoor wordt het mogelijk frequenties te synthetiseren tot en met de 2-meter band. De zender levert aan de XVTR-uitgang een vermogen van ca. 5 mW, genoeg om een linear aan te sturen [16].



Afb. 10: De FLEX-6700 kan met een van de beide ontvangers zijn eigen signaal op de XVTR uitgang meten. De TX-equalizer en audio-processoren zijn uitgeschakeld. De zender zendt witte ruis uit tot aan de uitsturingsgrens. De andere zijband is 80 dB onderdrukt

deel atmosferische ruis) is ongewenst verlies. De ADL5201 is door de firmware in stappen van 1 dB te programmeren.

Direct vóór de ADC zijn 72 MHz laagdoorlaatfilters geschakeld. Dit filter verhindert spiegelfrequentie effec-

banden in bijvoorbeeld het midden- en langegolfgebied. Er staat een spectraal zuiver signaal ter beschikking op 137 kHz en 474 kHz met een vermogen van +10 dBm (10 mW). Dat geldt ook voor de 4 meter band. Het primaire doel van de XVTR-uitgang is echter het gebruik van transverters mogelijk te maken met een willekeurige middenfrequentie zonder dat men rekening hoeft te houden met bandgrenzen. Zodra XVTR als TX-uitgang wordt gekozen is

De ADL5201 is een "digitally controlled, variable gain, wide band- width amplifier that provides precise gain control, high IP3, and low noise figure".

⁹ Intermodulatie afstand

De frequentie synthesise met de daarop aansluitende convertering door de DAC in een analoog zendsignaal is zo schoon, dus vrij van nevenfrequenties, harmonischen, spiegel-frequenties en intermodulatieproducten, dat afgezien kan worden van filtering na de DAC. Het zendsignaal wordt versterkt door een programmeerbare lineaire versterker (DVGA – AD5201) en staat dan ter beschikking op de XVTR uitgang. De eigenschappen van de FLEX-6700 als 2-m transceiver worden weergegeven in afb. 12: Beide ontvangers staan ingesteld op 2 meter om het spectrum met en zonder antenne te kunnen vergelijken.

4 METER BAND MET DE FLEX-6700 EN 6500.

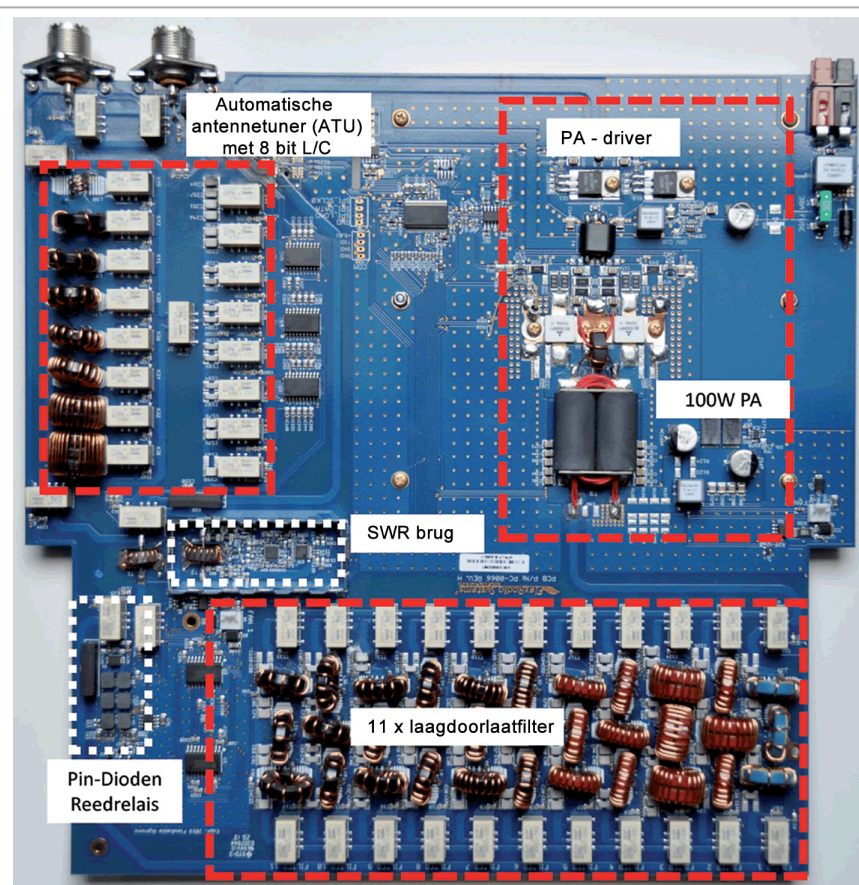
De 4 meter band kan zowel op de 6700 als 6500 worden gebruikt. Het zendsignaal op de XVTR bus is groot genoeg om een linear aan te sturen. Dergelijke versterkers zijn gemakkelijk zelf te maken maar zijn ook plug-&-play in de handel verkrijgbaar [16].

ANALOOG GEDEELTE. ZEND/ONTVANG OMSCHAKELING MET PIN DIODEN

Het zendergedeelte van de FLEX-6000 serie (Afb: 7a/b en 11) is volgens de huidige stand van de 13,8 Volt MOSFET techniek opgebouwd met Mitsubishi RD15HVF1 en RD100HHF1 MOSFET's.

Een geïntegreerde antennetuner (ATU) welke voor de FLEX-6300 optioneel is zorgt voor een juiste aanpassing tussen PA en asymmetrische antennes.

Omschakelen tussen zenden en ontvangen wordt verzorgd door PIN-dioden. De ontvanger wordt vanwege korte schakeltijden met reedrelais' van de antenne gescheiden. Met deze opstelling is QSK met een zeer hoge snelheid mogelijk. De firmware



Afb. 11: PA-print met de zend-ontvangstomschakeling (PIN-dioden), SWR meetbrug en de ATU.

schakelt alleen bij CW de PIN-dioden omschakeling in.

In alle andere modes wordt conventioneel met relais geschakeld.

Vermeldenswaardig is nog de schakeling rond de SWR brug. De FWD/REF spanningen worden door een AD8302 en een ADL5519 (tweevoudige logaritmische detector met een meetbereik van 62 dB) gemeten. Zowel de spanningswaarde als de fase wordt gemeten. Er is voor deze schakeling gekozen met het oog op toekomstige ontwikkelingen.

FREQUENTIEOPWEKKING EN REFERENTIEOSCILLATOR

Het grootsignaalgedrag van een ontvanger definieert de mogelijkheid om zwakke signalen te kunnen blijven ontvangen ondanks dat er gelijktijdig rond dat gewenste signaal zeer sterke andere signalen aanwezig zijn.

Bij de beoordeling van het groot signaal gedrag van ontvangers ligt de focus op het intermodulatievrije dynamische bereik.

Van groot belang is in dit verband de zijband ruis (zgn. Phase Noise) van de gebruikte oscillatoren. Bij verder volledig digitale techniek concentreert zich alles op de kwaliteit van de gebruikte analoge referentieoscillatoren, die in de FLEX-6700 op 983,04 MHz staat. Deze oscillator is tevens verantwoordelijk voor de zeer lage zijbandruis van de zender verantwoordelijk.

De oscillatoreigenschappen zijn -147 dBc@10 kHz en -152 dBc@100 kHz.

Doorslaggevend zijn echter de meetresultaten van het intermodulatievrije dynamisch bereik gebaseerd op de intermodulatieproducten van de derde orde (3IMD DR) en het door zijband en faseruis begrensde dyna-

misch bereik (RMDR¹⁰). Daarnaast ook de zijbandruis van de zender bij volledige uitsturing. In deel 3 zullen we hier verder op in gaan. De chef van het ARRL testlaboratorium heeft hierover een interessant boekwerk uitgegeven waarin hij de testmethodes in het ARRL laboratorium beschrijft.[17]

FLEX-6300 – DE BASIS-VERSIE VAN DE SERIE.

Voor de zendamateurs die wel willen investeren in een krachtige, toekomstzekere SDR maar geen belangstelling hebben voor bijzondere eigenschappen zoals extra VHF banden, vier of acht ontvangers (“slices”) biedt FlexRadio Systems de FLEX-6300 aan. Deze loot aan de 6000 serie is volgens dezelfde architectuur opgebouwd (afb. 7b) maar is qua mogelijkheden goed vergelijkbaar met de beide broers.

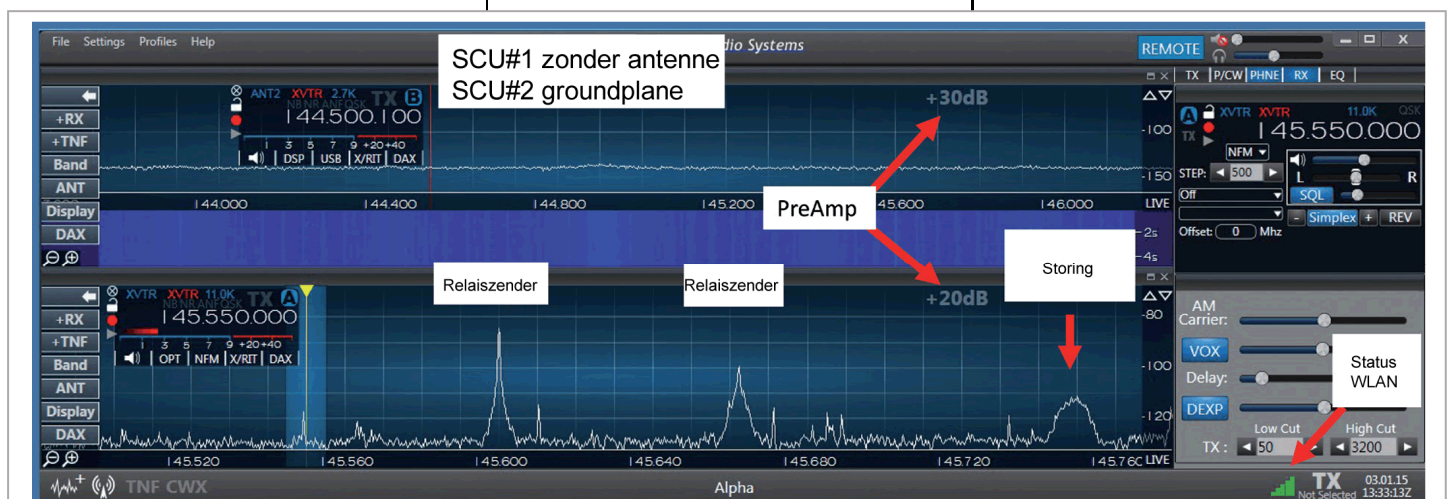
De FLEX-6300 heeft geen amateur-band preselector – zijn ingangselectie beperkt zich tot een notchfilter voor de FM-omroepband, het 160 meter hoogdoorlaatfilter en een 55 MHz laagdoorlaatfilter dat als anti-aliasing filter (AAS filter) werkt.

De ontvanger is dus breedbandig, de lezer zal zich dan afvragen welke beperkingen dit met zich meebrengt. Op de vraag of een preselector voor een volledige digitale ontvanger noodzakelijk is het nodig om het fundamentele verschil tussen een digitale en een analoge ontvanger te vergelijken. De analoge ontvangerconcepten gebruiken filters om in-band intermodulatie te vermijden. Daar waar smalbandige preselectoren niet meer zinvol zijn te realiseren moeten “roofing-filters” helpen om meng- en versterkertrappen te ontlasten. Deze noodzakelijkheden vervallen bij digitale ontvangerconcepten. Alleen het dynamisch bereik van de ADC is bepalend. Vanaf deingangsspanning waar de “ladder” van de digitalisering eindigt, is de uitgangswaarde nagenoeg constant, hij gedraagt zich als een ideale begrenzer. Bij een digitale ontvanger mag de somspanning aan de ingang van de ADC deze waarde niet overschrijden. In de FLEX-6000 serie worden AD9467's gebruikt, hun uitsturingsgrens ligt bij ca. +7 dBm.

Deze waarde komt overeen met een signaal van $S9^{+80dB}$. We kunnen stellen dat het merendeel van de zendamateurs niet over antennes beschikken die regelmatig dergelijk signalen produceren. Een volledig andere situatie ontstaat in een contest of bij een velddag. Als er meerdere stations op een klein oppervlakte werken (DX-pedities) of als de buurman ook zendamateur is, dan zijn bandpasfilters en preselectoren onontbeerlijk. In elk geval zullen bij volledig gedigitaliseerde ontvangerconcepten (zoals een FLEX-6300) MG-omroepstations zeker door een 1,8 MHz hoogdoorlaatfilter moeten worden geblokkeerd.

De FLEX-6300 onderscheidt zich in de hardware door de optioneel verkrijgbare ATU, het ontbreken van een balans-microfooningang en digitaaltechnieken met lagere kloksnelheden.

De referentieoscillator/systeemklok staat op 122,88 MHz. De 1^e. Nyquistzone eindigt op ongeveer 61 MHz, het antialiasing filter is daarom gedimensioneerd op 55 MHz.



Afb. 12: Beide ingangen (SCU's) staan op de 2 meterband. SCU #1 zonder antenne geeft de hele 2m band weer bij de hoogste RX gevoeligheid. SCU #2 is ingesteld op een deel van de 2m band. De FLEX-6700 wordt in dit geval “remote” via WLAN bestuurd, rechtsonder wordt de signaalsterkte van het WLAN signaal weergegeven.

¹⁰ Reciprocal Mixing Dynamic Range)

Tevens is er afgezien van de mogelijkheid om in de RX ingang perifere apparaten aan te kunnen sluiten.

Ook het achteraf plaatsen van een GPSDO is niet mogelijk, de GPSDO aansluiting (afb. 6 in deel 1) is weliswaar aanwezig maar kan vooralsnog niet worden gebruikt.

De weergave van het frequentiespectrum en het aantal ontvangers is vanwege het gebruik van een minder krachtige FPGA tot twee begrenst. Desondanks is de FLEX-6300 op grond van zijn architectuur een even krachtige SDR server als zijn grote broers.

In deel drie gaan we meetgegevens van FlexRadio Systems zelf en dat van het ARRL lab [18] en van Rob Sherwood bespreken.

(wordt vervolgd)

Literatuur- en andere bronnen

- [11] Voordracht tijdens HAM RADIO 2014 De voordrachten zijn te vinden op: <http://hamsdr.com/dnld.aspx>
- [12] s.a. „Möglichkeiten der Hard und Softwareentwicklung mit PSoC“, Wolfgang Kiefer, FA 3/15, S. 267ff.
- [13] Tony J. Roupheal, „RF And Digital Signal Processing For Software-Defined Radio“ Amsterdam/Tokyo 2009
- [14] „Tutorials MT-001 tot MT-013“, uitgegeven door Analog Devices – Auteur is Walt Kester: www.analog.com/media/en/trainingseminars/tutorials/MT-001.pdf
- [15] Als Standaardwerk aan te bevelen: „The Data Conversion Handbook“, Hrsg. Walt Kester, Analog Devices. Het boek is ook in digitale vorm te verkrijgen op: [http:// free-computerbooks.com/the-dataconversion- handbook-2005-engineering-staff-analog-devices-inc.html](http://free-computerbooks.com/the-dataconversion-handbook-2005-engineering-staff-analog-devices-inc.html)
- [16] [www.downtownmicrowave.com/ product-p/2mldpa-75.htm](http://www.downtownmicrowave.com/product-p/2mldpa-75.htm) en http://flexradioshop.com/contents/nl/d63_Linear_voor_6000_serie.html
- [17] Bob Allison, WB1GCM: „Amateur Radio Transceiver Performance Testing– Understanding HF Transceiver Data“, ARRL Publicatie, 2013: www.arrl.org/shop/Amateur-Radio-Transceiver-Performance-Testing
- [18] Product Review FLEX-6700/FLEX- 6300 in QST April/2015 van de ARRL.: www.flexradio.com/downloads/qst-flex-6700_flex-6300-april-2015-pdf

OORSPRONKELIJKE AUTEUR: KLAUS LOHMANN, DK7XL
VERTAALD, BEWERKT EN AANGEVULD: GER METSELAAR, PA0AER